



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403514

引用格式:李皓东,朱俊宇,王辉,等.兰州彭家坪砂岩型热储地热尾水回灌试验结果分析与启示[J].科学技术与工程,2025,25(11):4438-4447.

Li Haodong, Zhu Junyu, Wang Hui, et al. Analysis and insights of the experiment results of geothermal tail water reinjection in sandstone-type thermal storage at Pengjiaping, Lanzhou[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4438-4447.

兰州彭家坪砂岩型热储地热尾水回灌 试验结果分析与启示

李皓东^{1,2,3}, 朱俊宇^{1,2}, 王辉^{1,2}, 刘文辉^{1,2}, 刘行祥^{1,2,3}, 李松^{1,2,3*}

1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 兰州 730020;
2. 甘肃水文地质工程地质勘察院有限责任公司, 兰州 730020;
3. 甘肃省地热资源勘查开发技术创新中心, 兰州 730020)

摘要 地热尾水回灌是目前制约兰州盆地地热资源开发利用的主要瓶颈。为了突破兰州盆地砂岩型热储地热尾水回灌的技术空白,依托兰州市彭家坪地热供暖示范工程,首次设计开展了15、20、25、28 m³/h的梯级流量自然回灌试验和0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa的梯级压力加压回灌试验,首次取得了兰州盆地彭家坪砂岩型热储最大稳定自然回灌量27.96 m³/h、加压0.667 MPa的稳定回灌量为51.68 m³/h的成果参数,并研究了地热尾水回灌对采水井水位、水温和温度场的影响。经过一个供暖季的生产性回灌试验验证,在兰州盆地成功探索出了一套适宜、可行的砂岩型热储地热尾水回灌技术工艺,对兰州盆地地热资源规模化高质量开发利用具有重要的参考和借鉴意义。

关键词 兰州盆地; 砂岩型热储; 回灌试验; 回灌技术工艺

中图法分类号 P314;

文献标志码 A

Analysis and Insights of the Experiment Results of Geothermal Tail Water Reinjection in Sandstone-type Thermal Storage at Pengjiaping, Lanzhou

LI Hao-dong^{1,2,3}, ZHU Jun-yu^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, LIU Wen-hui^{1,2}, LIU Xing-xiang^{1,2,3}, LI Song^{1,2,3*}

1. Second Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Lanzhou 730020, China;
2. Gansu Hydrogeology and Engineering Geological Survey Institute Co., Ltd., Lanzhou 730020, China;
3. Gansu Provincial Geothermal Resources Exploration and Development Technology Innovation Center, Lanzhou 730020, China)

[Abstract] Geothermal tail water reinjection is the main bottleneck that restricts the development and utilization of geothermal resources in Lanzhou Basin. In order to break through the technological gap of geothermal tail water reinjection in Lanzhou Basin sandstone-type thermal storage, relying on the geothermal heating demonstration project in Pengjiaping, Lanzhou City, for the first time, the natural reinjection experiment with graded flow rates of 15, 20, 25, 28 m³/h and graded pressure pressurised reinjection experiment of 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa were designed and carried out, the maximum stable natural reinjection volume of 27.96 m³/h and the stable reinjection volume of 51.68 m³/h for 0.667 MPa pressure were firstly obtained from the sandstone-type thermal storage of Pengjiaping, Lanzhou Basin, and the impact of geothermal tail water reinjection on the water level, water temperature, and temperature field of the extraction wells was also investigated. After a heating season of productive reinjection experiment verification, a set of suitable and feasible sandstone-type thermal storage geothermal tail water reinjection technology process has been successfully explored in Lanzhou Basin, which is of great reference and significance for the large-scale and high-quality development and utilization of geothermal resources in Lanzhou Basin.

[Keywords] Lanzhou Basin; sandstone thermal storage; reinjection experiment; reinjection technology process

收稿日期: 2024-05-13 修订日期: 2024-08-01

基金项目: 甘肃省科技计划(22YF11GA320); 甘肃省地矿局2021年度创新项目(2021CX06)

第一作者: 李皓东(1991—), 男, 汉族, 甘肃庆阳人, 工程师。研究方向: 地热资源勘查及开发利用。E-mail: 535036315@qq.com。

* 通信作者: 李松(1985—), 男, 汉族, 湖北襄阳人, 硕士, 高级工程师。研究方向: 地质灾害评价、地热开发利用。E-mail: 185773857@qq.com。

近年来,能源短缺和环境污染已成为全社会共同面临的重大挑战。地热能作为一种清洁可再生的绿色能源而得到社会广泛关注^[1-2],由于其具有可再生和清洁无污染等特点,已广泛用于供暖、工业、养殖等领域^[3],是继太阳能和风能后最具发展前景的绿色能源^[4]。但地热能开发过程中,若地热尾水回灌得不到保证,将会导致地热资源浪费和热储层压力下降,影响地热资源可持续开发利用^[5-7]。因此,开展地热尾水回灌试验研究、探索地热尾水回灌技术是地热资源可持续利用的科学问题和关键技术之一^[8]。

众多学者针对砂岩热储地热尾水回灌开展了大量研究,Axelsson等^[9]对回灌井相对位置进行了研究,认为在靠近采水井的位置回灌,便于恢复热储的地层压力。Ganjdanesh等^[10]分析了砂岩热储回灌性能,认为回灌具有提高生产可持续性、降低储层连通性风险等优点。Hawkins等^[11]研究了砂岩热储回灌中的热交换效应,认为地层的裂缝网络会促进热突破的发生。Markó等^[12]在匈牙利东南部进行了回灌实验研究,认为砂岩热储较低的回灌效率主要由热储层的物性决定。中国针对地热回灌问题也进行了大量研究。李红岩^[13]研发了砂岩地热尾水经济回灌系统,主要采用了地热水除砂装置、分(集)水器、换热装置、变频加压装置、除气装置、三级过滤装置,其特征主要在于开采井和回灌井可相互转换,减轻回灌井的压力,该技术工艺适用于供暖规模小,供热管网路由简单的工况;李娜娜^[14]研发了一种集成式地热尾水回灌系统,主要包括地热尾水粗、精过滤、加压、气体反冲洗、计量等集成组装系统,该系统虽然集成程度高,灵活简便,但过滤工艺过于简单,适用于水质相对较好的工况;冯红喜等^[15-16]开展了加压条件下对井同层回灌试验,并研发了一种地热尾水回灌系统,该系统通过过滤漂浮物、过滤固体颗粒和剔除气泡后,经过加压装置将地热尾水注入回灌井中,但该回灌系统整体过滤级别偏低,重点对漂浮物、固体颗粒进行了过滤,对地热尾水中的微粒未起到很好的过滤效果,容易造成回灌井堵塞,影响回灌效果;丁祥^[17]提出了地热水等量持续回灌技术,通过将整个开采回灌系统封闭抽真空来消除水中溶解性气体,并经过滤除砂后进行加压回灌,该技术仅适用于含沙量小,水质较好的地区,对砂岩型热储而言,其过滤级工艺很容易导致过滤器堵塞;王学鹏等^[18]进行了砂岩热储的自然回灌试验研究,认为回灌对热储层水质影响小且回灌井最大回灌量为 $70\text{ m}^3/\text{h}$ 。由于地热尾水回灌主要取决于当地热储层的类型^[19],虽然

上述研究在解决地热尾水回灌问题方面积累了丰富的经验,但总结发现,上述研究均是针对当地独特的地质条件、地热水质特征,而不同区域热储特征和水质特征差异较大,故没有任何一种完全通用的技术工艺。因此,对于兰州盆地细沙乃至粉砂的热储层,加上高含沙量的地热水质,当前没有可以直接参考利用的成熟技术工艺,急需开展试验研究探索适用于兰州盆地的回灌技术和工艺。

为解决兰州盆地砂岩型热储地热尾水回灌难题,在现有研究成果的基础上,以兰州市七里河区彭家坪首个地热供暖示范工程为依托,首次在兰州盆地设计开展了一个供暖季的梯级流量自然回灌和梯级压力加压回灌试验,并取得了翔实的试验数据,通过水质含沙量及颗分测试,对回灌工艺流程进行调整优化,总结出一套适宜于兰州盆地砂岩型热储地热尾水回灌的技术工艺,填补了兰州盆地地热尾水回灌的空白,为兰州盆地地热资源规模化开发利用提供技术支撑,具有重要的参考和借鉴意义。

1 地热地质背景

兰州地区属典型的盆地砂岩型地热资源,其赋存和展布主要受控于其所在的兰州坳陷这一大型盆地构造单元。其南北边界由NWW-NW向宋家沟-直沟门断裂(F2)、金城关断裂(F1)分别控制,东西边界由桑园峡桃树坪基底隆起和NNW向寺儿沟断裂(F4)分别控制,盆地东西长32 km,南北宽10~14 km。随着构造运动的发展演化,从古近纪到第四纪沉积中心受边界断裂活动影响,在盆地中心发育NNW向深沟桥断裂(F5)、雷坛河断裂(F8)等次级断裂,故而形成七里河断陷次级盆地构造。兰州盆地和七里河次级断陷盆地的形成,造就了兰州地热资源富集的必要条件,图1为兰州盆地基地等值线图。本研究项目位于兰州盆地南部,地处兰州市七里河区彭家坪镇,热储层主要为古近系西柳沟组(E_{1-2x}),热储岩性以砂岩夹砂砾岩为主,热储埋藏深度1 350~1 707 m,热储层厚度450~722 m,热储岩性孔隙率1.58%~27.8%,渗透率0.26~594.3 mD,静水位-89~+30 m。

2 回灌试验概况

2.1 井间距确定

根据《GB/T 11615—2010 地热资源地质勘查规范》^[20],对于盆地型地热田,可按单井允许开采量开采100年、消耗15%左右地热储量,采用单井权益保护半径计算公式为

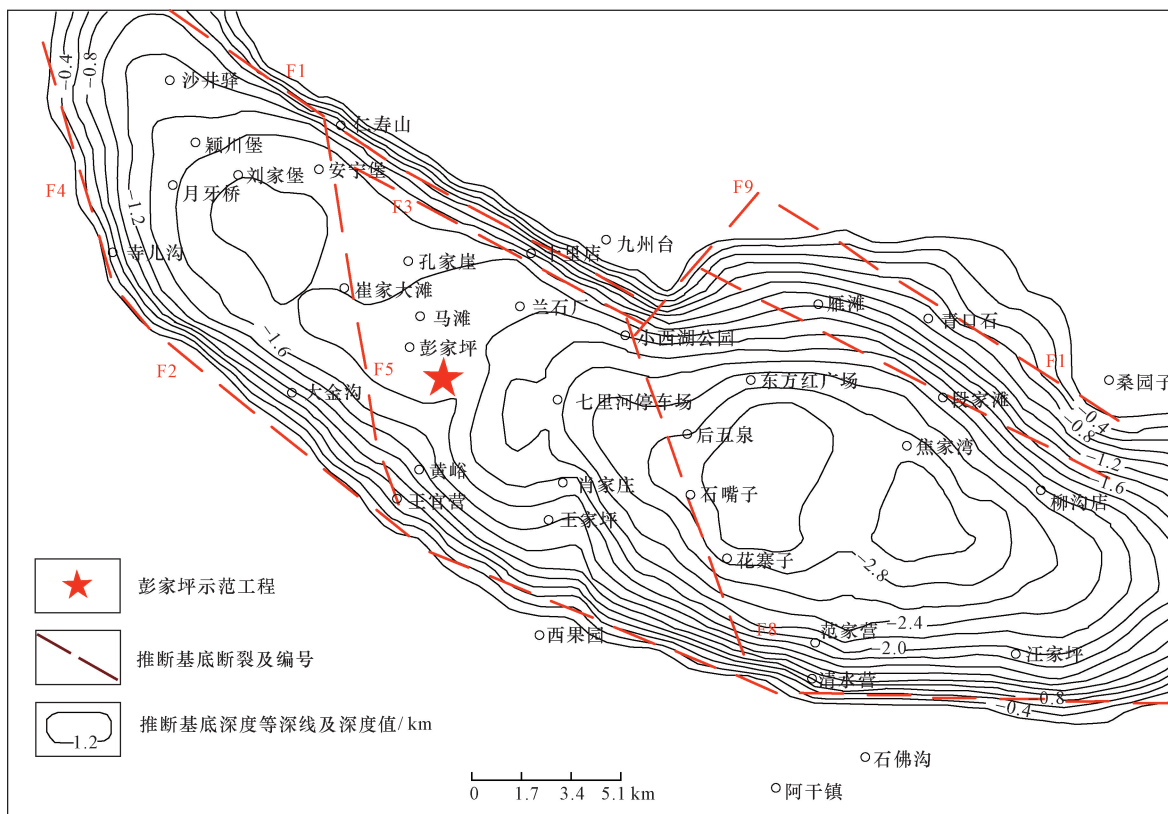


图1 兰州盆地基地等值线图
Fig. 1 Contour map of the base of the Lanzhou Basin

$$R_1 = \sqrt{\frac{36\ 500Qf}{0.15H\pi}} \quad (1)$$

式(1)中: Q 为地热水可开采量, m^3/d ; f 为水热容与热储热容的比值; H 为热储的厚度, m ; R_1 为地热井开采 100 a 排出热量对热储的影响半径, m 。

另根据刘志明等^[21]对盆地性地热田地热回灌条件下单井开采权益保护半径的研究结果(表 1), 在回灌条件下, 单井开采权益保护半径为

$$R_2 = \sqrt{1 - \alpha\beta} \sqrt{\frac{36\ 500Qf}{0.15H\pi}} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{T_2 - T_0}{T_1 - T_0} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{Q_{\text{回}}}{Q} \quad (4)$$

式中: T_0 为基准温度, 取恒温层温度或当地多年平均气温, $^{\circ}\text{C}$; T_1 为热储层回灌前温度, $^{\circ}\text{C}$; T_2 为回灌水温度, $^{\circ}\text{C}$; Q 为地热水可开采量, m^3/d ; $Q_{\text{回}}$ 为回灌量, m^3/d 。

但是, 上述两种计算方法均是按照开采 100 a 进行模拟计算, 实际单井使用年限达不到 100 a, 故而上述方法计算结果明显偏大。为更加合理选择参与试验研究的地热井间距, 参考刘师等^[22]层状热储地热井权益保护半径计算探讨结论, 确定地热井

权益保护半径计算公式为

$$R = \sqrt{\frac{tQ(\rho_w c_w)}{\pi\lambda H(\rho_\alpha c_\alpha)}} \quad (5)$$

式(5)中: Q 为地热水可开采量, m^3/d ; t 为地热井开采天数; λ 为热储回收率, 无量纲, 岩溶裂隙热储取值 0.15; ρ_w 为流体密度, kg/m^3 ; c_w 为流体比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ_α 为热储层密度, kg/m^3 ; c_α 为热储层比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

通过对上述 3 种计算模型进行计算比较, 可以得出 $R_1 = 573.77\ \text{m}$, $R_2 = 538.70\ \text{m}$, $R = 202.39\ \text{m}$ 。参照中国其他地区如北京、天津、陕西、德州等地, 地热井间距基本在 250 ~ 500 m ^[23-25], 可以看出式(5)的计算结果更加符合实际情况, 故确定回灌试验采灌井间距应大于 404.79 m 。

表 1 单井开采权益保护半径计算参数一览表
Table 1 List of calculation parameters for the protection radius of single-well mining rights

参数	$Q/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	$\rho_w/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_w/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$
取值	1 359.6	1 000	4 180
参数	$\rho_\alpha/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_\alpha/[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}]$	H/m
取值	2 600	870	586
参数	λ	$T_0/^{\circ}\text{C}$	$T_1/^{\circ}\text{C}$
取值	0.15	10.4	84.3
参数	$T_2/^{\circ}\text{C}$	$Q_{\text{回}}/(\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	
取值	20	51.68	

本回灌试验所依托的兰州市彭家坪地热供暖示范工程共有地热井3眼,编号分别为DR2、KP1、KP2。其中KP1、KP2井间距为1 200 m,KP1、DR2井间距为740 m,KP2、DR2井间距为1 740 m。根据确定的采灌井间距,KP1、DR2井组合符合试验需求,也是最佳试验井位。依据两眼地热井相对位置,KP1地热井距离小区供热站更近,直线距离220 m,可以最大程度降低地热水输送过程中温度损耗,节约能源,故选定KP1地热井作为试验采水井,DR2地热井作为回灌井,开采回灌井位置图如图2所示。

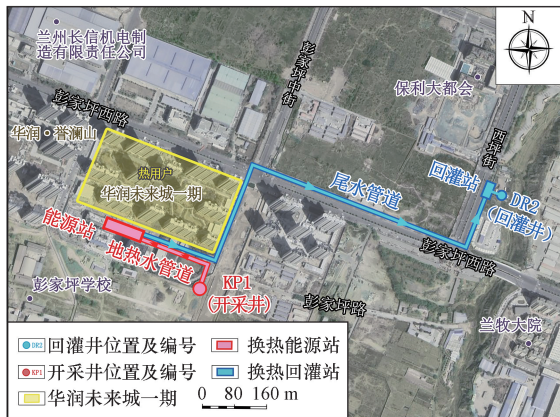


图2 开采回灌井位置图

Fig.2 Location map of mining reinjection wells

2.2 采灌井结构及层位对比

本试验选取的KP1采水井井深为2 530 m,取水段1 300~2 473 m,取水层位主要为古近系地层中砂岩、砂砾岩含水层段;DR2回灌井井深为3 000.48 m,回灌段1 050.52~2 429.0 m,回灌层位主要为古近系地层中砂岩、砂砾岩含水层段。KP1的取水层与DR2的注水层均位于古近系地层中,故满足地热尾水同层回灌的技术要求。KP1、DR2目标含水层位位置详见表2、表3。

表2 KP1采水井主要开采目标含水层位置

Table 2 The location of the main target aquifer in the KP1 mining well

开采目标含水层编号	目标含水层位/m	层厚/m	套管尺寸/mm
①	1 381.48 ~ 1 449.17	67.69	177.8
②	1 605.38 ~ 1 626.73	21.35	177.8
③	1 638.45 ~ 1 693.65	55.20	177.8
④	1 703.93 ~ 1 714.89	10.96	177.8
⑤	1 794.09 ~ 1 804.97	10.88	177.8
⑥	1 843.12 ~ 1 865.72	22.60	177.8
⑦	1 904.07 ~ 1 937.78	33.71	177.8
⑧	2 100.85 ~ 2 157.96	57.11	177.8
⑨	2 296.08 ~ 2 318.67	22.59	177.8
小计		302.09	

表3 DR2回灌井主要回灌目标含水层位置

Table 3 Locations of the main reinjection target aquifers of DR2 reinjection wells

回灌目标含水层编号	目标含水层位/m	层厚/m	套管尺寸/mm
①	1 315.00 ~ 1 321.25	6.25	177.8
②	1 327.65 ~ 1 340.95	13.30	177.8
③	1 357.40 ~ 1 411.75	54.35	177.8
④	1 549.25 ~ 1 556.50	7.25	177.8
⑤	1 633.60 ~ 1 641.80	8.20	177.8
⑥	1 687.25 ~ 1 739.25	52.00	177.8
⑦	1 747.00 ~ 1 946.65	199.65	177.8
⑧	2 030.00 ~ 2 040.65	10.65	177.8
⑨	2 160.45 ~ 2 166.60	6.15	177.8
⑩	2 176.90 ~ 2 189.95	13.05	177.8
⑪	2 201.05 ~ 2 423.70	222.65	177.8

2.3 回灌方法和过程

结合兰州盆地地热水特性,依据回灌技术规范,选用的回灌试验工艺流程为:采水井抽出的62℃地热水沿保温管道进入换热站,进站后先通过旋流除砂器除砂,除砂后进入200目无纺布袋式过滤器,然后进入板式换热器进行热交换,换热后的地热尾水则沿管道进入回灌站后依次通过10 μm的聚丙烯PP粗过滤器和2 μm的聚丙烯PP精过滤器进行过滤,过滤后转入曝气罐排气,排气后的地热尾水在加压泵的作用下加压注入回灌井,如图3所示。

由于兰州地区砂岩型热储地热水中含沙量较大,采用旋流除砂器配合10 μm粗滤和2 μm精滤三级过滤工艺使得系统连续运行2~3 h便发生堵塞,直接影响回灌效果及系统运行稳定性。为了切实掌握兰州盆地地热水中含沙量及各粒径级别所占比例,试验过程中分别采集3组水样开展了地热水含沙量及颗粒分析。其中,粒径在50 μm以上占比33.72%,30 μm以上占比50.01%,10 μm以上占比75.89%,5 μm以上占比91.68%,5 μm以下占比8.33%,分析结果如图4所示。

根据含沙量及颗分结果对过滤工艺进行了优化,将200目无纺布袋式过滤器更换为150目不锈钢自清洁过滤器+200目尼龙网袋式过滤器,回灌站中将原10 μm粗滤+2 μm精滤组合调整为30 μm粗滤+5 μm精滤组合,优化后的工艺可有效减轻回灌过滤系统堵塞,保障了回灌系统的稳定运行及后续试验的顺利进行。

图5所示为回灌系统过滤设备照片,基于优化工艺,分别开展自然回灌和加压回灌试验,其中自然回灌试验设计以15 m³/h为起始回灌量,之后按照5 m³/h的梯度增量开展梯级流量自然回灌试验,

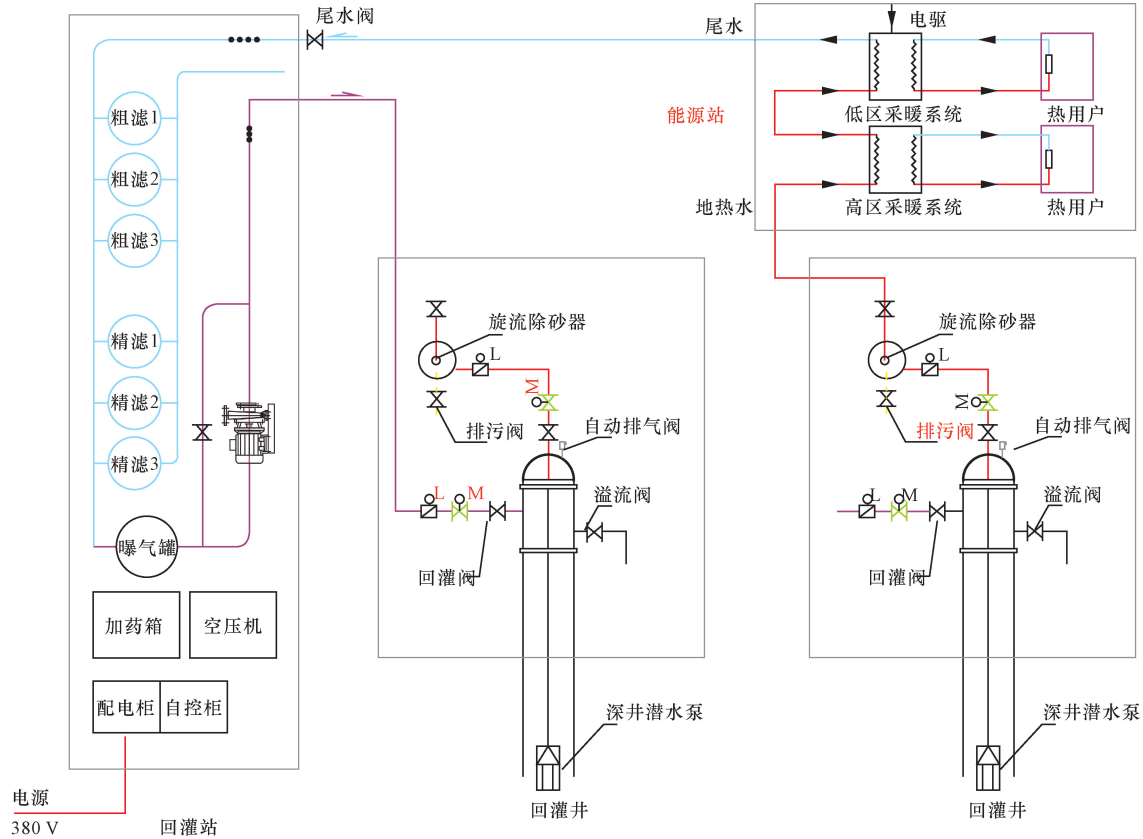


图3 回灌试验工艺流程图

Fig. 3 Process flow diagram of reinjection experiment

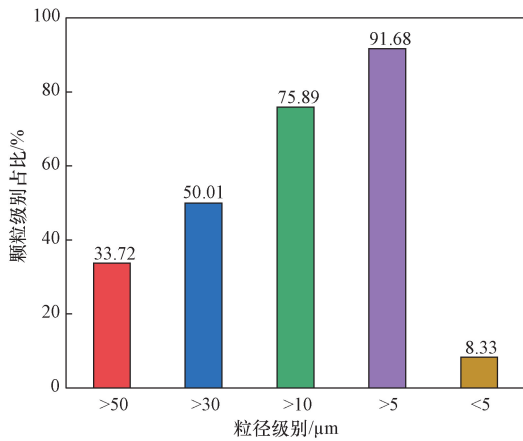


图4 粒径级别划分图

Fig. 4 Particle size classification diagram

水位每级稳定 48 h 以上,最大自然回灌量以回灌井水位距井口不少于 10 m,稳定时间大于 120 h 为准;加压回灌试验设计以 0.1 MPa 为起始回灌压力,之后按照 0.1 MPa 梯度增量开展梯级压力加压回灌试验,压力每级稳定 48 h 以上,最大回灌量稳定时间应大于 120 h。试验过程中采水井水位、水温、水量及回灌井水温、水压、水位、水量等参数均采用自动记录仪监测记录,监测频率 30 min/次。



(a)换热站前端



(b)回灌站后端

图5 回灌系统过滤设备照片

Fig. 5 Photos of reinjection system filtration equipment

3 结果与分析

3.1 自然回灌成果

地热尾水回灌对维持热储压力、稳定地热井产能及实现地热可持续开发利用具有非常重要的作用。为了研究回灌井在自然回灌模式下的回灌能力, 根据现场试验条件, 分别开展了回灌量为 15、20、25、28 m³/h 的自然回灌试验, 试验结果如图 6 和表 4 所示。

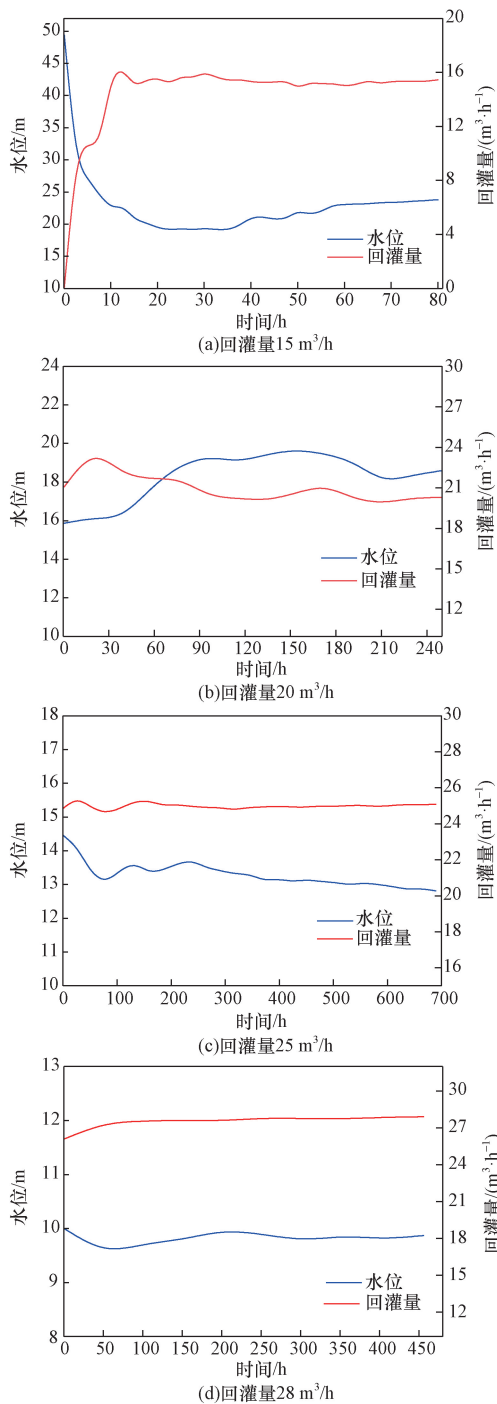


图 6 自然回灌试验成果

Fig. 6 Results of natural reinjection experiment

表 4 自然回灌试验参数结果

Table 4 Parameter results of natural reinjection experiment

回灌流量/ (m ³ ·h ⁻¹)	持续 时长/h	平均回灌量/ (m ³ ·h ⁻¹)	平均稳定 水位/m	平均回灌 温度/°C
15	78	15.41	23.54	38.75
20	249	20.32	18.55	39.32
25	689	25.06	12.85	43.93
28	456	27.96	9.76	44.13

从试验结果可以看出, 随着回灌量逐渐增加, 水位也随之升高, 当回灌量为 15 m³/h 时, 水位先下降后上升, 最后达到平衡。当回灌量为 20 m³/h 时, 随着回灌量小幅度的降低, 而水位也表现出下降趋势, 表明回灌井渗透率大, 回灌性能好。当回灌量稳定为 25.06 m³/h 时, 回灌持续时间 689 h, 其水位表现出上升趋势, 但上升幅度较小, 这主要是由于地热水连续回灌使得热储层渗透率下降引起的。而当最大回灌量稳定为 27.96 m³/h 时, 累积持续时间 264 h, 其水位基本保持稳定。综上, 可以说明热储层回灌可持续性较好。

3.2 加压回灌成果

为了研究回灌井在不同回灌压力下的回灌能力, 通过调节加压泵频率, 分别开展了回灌压力为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 MPa 的加压回灌试验, 试验结果如表 5 和图 7 所示。

从试验结果可以看出, 回灌量的整体变化规律是其随着回灌压力的增加而逐渐增大, 两者之间呈正相关关系。在回灌压力分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 MPa 时的回灌率分别为 67.36%、73.88%、74.11%、75.50% 和 83.72%。当回灌压力为 0.6 MPa 时, 持续回灌时间为 383 h, 其平均回灌压力为 0.667 MPa, 平均回灌量为 51.68 m³/h, 回灌率达到了 91.58%, 且回灌系统整体运行平稳, 说明加压可以提升地热尾水回灌效率, 也说明热储层渗透性能好, 具有很大的回灌潜力, 基本可以达到全回灌。

表 5 加压回灌试验参数结果

Table 5 Parameter results of pressurized reinjection experiment

加压压力/ MPa	平均回灌 压力/MPa	持续 时间/h	平均回灌 温度/°C	平均回灌量/ (m ³ ·h ⁻¹)
0.1	0.107	10	28.64	38.99
0.2	0.205	11	29.53	42.51
0.3	0.307	172	28.96	43.43
0.4	0.403	164	29.68	44.35
0.5	0.514	52	29.53	47.02
0.6~0.7	0.667	383	32.88	51.68

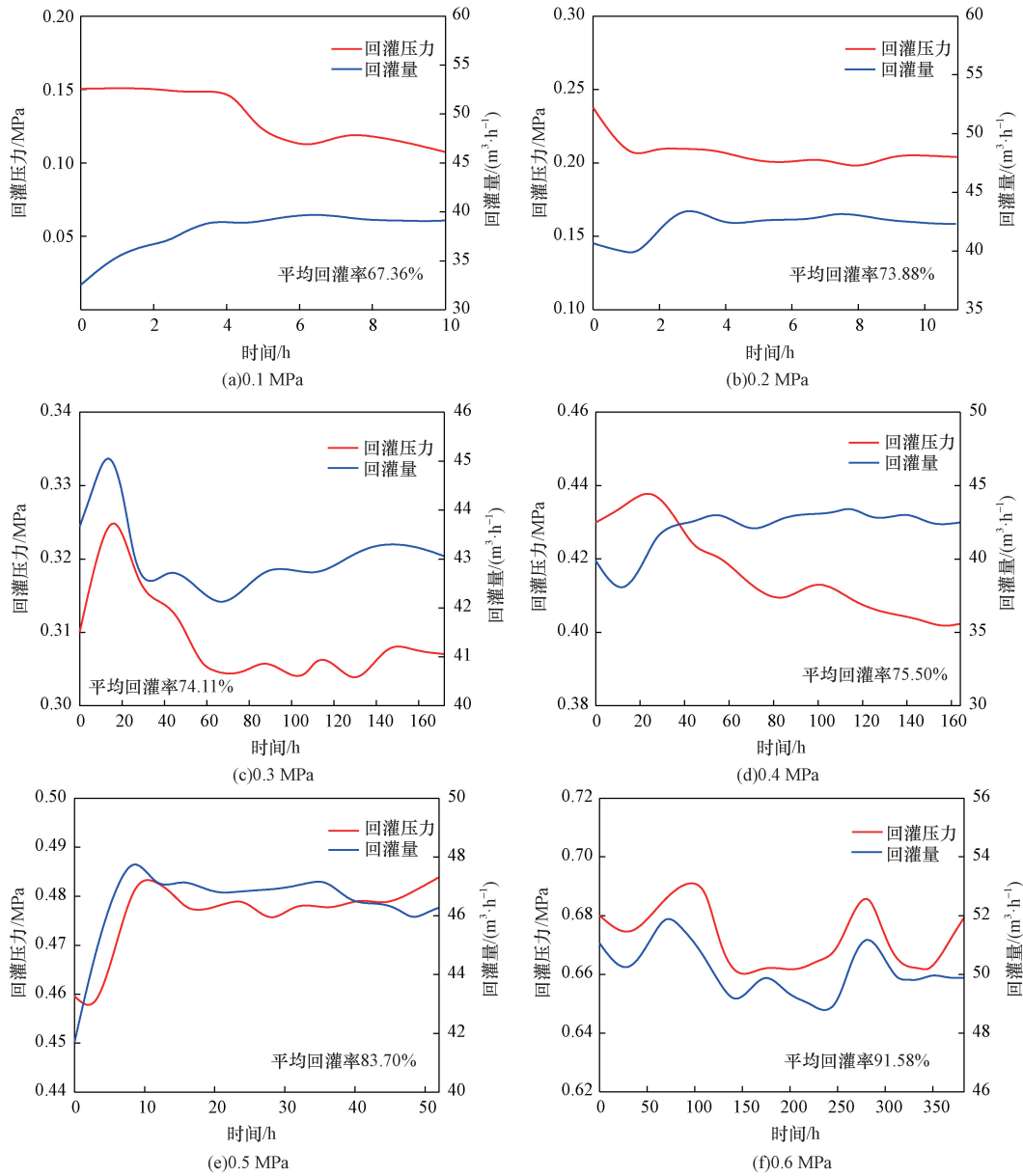


图7 加压回灌试验成果图

Fig. 7 Results of pressurized reinjection experiment

3.3 回灌量与回灌压力分析

通过对加压回灌的试验结果进行对比分析,可以发现回灌压力直接决定了回灌量的最大极限。图8所示为回灌量与回灌压力关系模型拟合图,经过对0.1~0.6 MPa回灌压力与回灌量的关系进行趋势分析,两者之间的相关系数为0.982,为完全相关。通过对试验取得的回灌压力与回灌量曲线进行数值拟合,得到其线性相关关系为

$$y = 95.297x^3 - 109.83x^2 + 54.551x + 34.52, \quad R^2 = 0.964 \quad (6)$$

式(6)中: x 为回灌压力,MPa; y 为回灌量, m^3/h 。

根据数值拟合结果,预测兰州盆地砂岩型热储加压1.0 MPa时回灌量可达到74.52 m^3/h ,加压

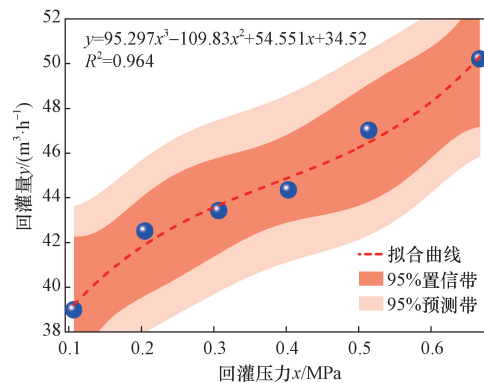


图8 回灌量与回灌压力关系模型拟合图

Fig. 8 Fitting diagram of the relationship between reinjection volume and reinjection pressure

1.2 MPa 时回灌量可达到 $106.47 \text{ m}^3/\text{h}$, 加压至 1.5 MPa 时回灌量将达到 $190.79 \text{ m}^3/\text{h}$ (注:本预测模型的基础条件为回灌井静水位 48 m, 回灌井管井 273 mm)。

3.4 回灌量与采水井水位分析

地热尾水回灌的目的是为了防止因持续开采而造成地热水补给能力不足, 引起水位降低、热储压力下降等不良地质问题。图 9 为回灌量与采水井水位关系图, 可以看出, 在整个回灌过程中, 随着回灌量逐渐增大, 采水井水位的整体变化趋势为先上升后逐渐下降, 最终趋于稳定。当增大回灌速率时, 采水井水位出现同步回升。而本次采灌试验的持续时间为 2 264 h, 这说明采水井的水位并未随着开采时间而持续下降, 反而在回灌量增大后水位出现了同步回升。可以证明兰州盆地砂岩型热储地热尾水同层回灌技术的可行性, 同时也证明该技术对于地热资源的可持续开发利用具有至关重要的作用。

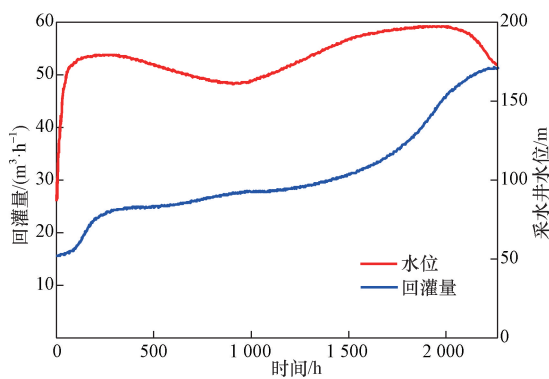


图 9 回灌量与采水井水位关系图

Fig. 9 Diagram of the relationship between reinjection volume and water level of mining wells

3.5 回灌量与回灌水温分析

回灌压力影响回灌效果, 而地热尾水温度直接影响回灌水密度, 进而影响回灌压力, 所以回灌水温度的合理性直接影响回灌效果的好坏。回灌量随回灌水温的变化曲线如图 10 所示, 可以看出, 回灌量随着回灌水温的降低而增大并逐渐趋于稳定, 回灌量与回灌水温之间呈负相关关系, 这与文献[26]中的研究结果相一致, 说明了在地热尾水回灌中, 较低的回灌温度可以增加回灌量, 有助于提升回灌效率。从图 10 还可以看出, 当水温高于 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 回灌量的增长速率较大, 当水温低于 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 回灌量的增长速率趋于平缓, 说明回灌水温度为 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 是一个明显的分界点, 建议在实际生产中将回灌水温控制在 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, 预期能达到较好的回灌效果。

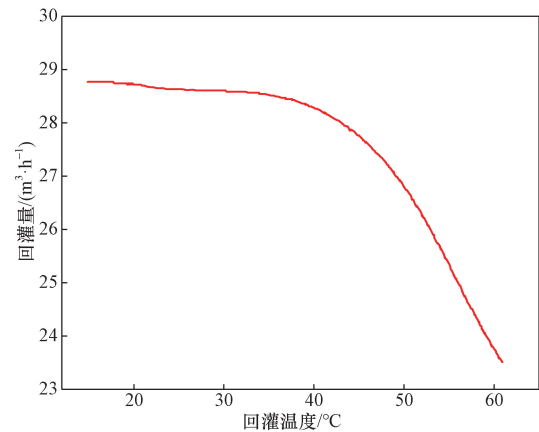


图 10 回灌量随回灌水温变化曲线

Fig. 10 Variation curve of reinjection volume with reinjection water temperature

3.6 温度场分析

为确保地热水利用的可持续性, 需要避免采水井因出现热突破而导致水温显著降低的问题。在自然回灌和加压回灌两种模式下, 采水井的井温变化曲线如图 11 所示。

由图 11 可知, 整个回灌试验持续时间为 2 264 h, 在回灌试验期间, 采水井水温在长期开采后趋于稳定, 其水温波动较小, 未出现因长期开采而水温显著降低的现象, 平均出水温度为 $62.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 与开采初期水温相比水温下降幅度为 $2 \sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$, 可以说明地热尾水长期回灌未对采水井水温产生影响, 采灌井间未发生热突破, 即地热尾水回灌对地温场的影响半径小于 740 m 。

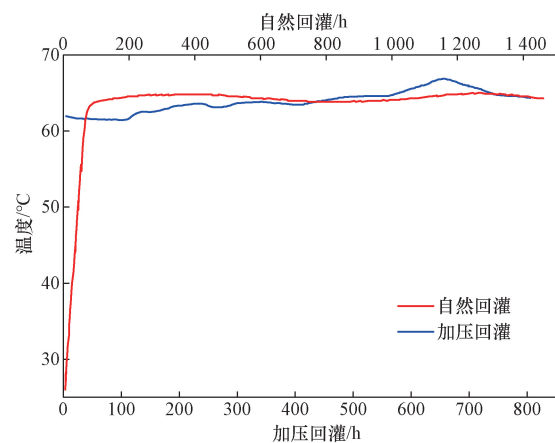


图 11 两种回灌模式下 KP1 井温变化曲线

Fig. 11 Temperature curves of KP1 in two reinjection modes

3.7 回灌工艺评价

优化工艺是在原工艺的基础之上, 将 200 目无纺布袋式过滤器更换为 150 目不锈钢自清洁过滤器 + 200 目尼龙网袋式过滤器, 回灌站中将原 $10 \text{ }\mu\text{m}$ 粗滤 + $2 \text{ }\mu\text{m}$ 精滤组合更换为 $30 \text{ }\mu\text{m}$ 粗滤 + $5 \text{ }\mu\text{m}$ 精滤

组合。对工艺优化前后系统运行效果进行对比,优化后的工艺组合使滤芯堵塞反冲洗频率由原来的2~3 h/次降为2~3 d/次,滤芯更换频率由原来的2 d/次降为7 d/次,系统整体运行效果较稳定。因此,经综合研究分析,最终确定适宜于兰州盆地砂岩型热储地热尾水回灌技术工艺流程为:采水井→旋流除砂器→150目不锈钢自清洗过滤器→200目尼龙网过滤器→热力站→30 μm粗滤→5 μm精滤→曝气罐→加压泵→回灌井。

4 结论与启示

依托兰州市彭家坪地区首个地热供暖示范工程,开展了兰州盆地首个砂岩型热储地热尾水回灌试验研究,经对试验结果综合研究分析,得出如下结论与启示。

(1)兰州盆地彭家坪砂岩型热储最大稳定自然回灌量为27.96 m³/h,在加压0.667 MPa时,平均回灌量可以达到51.68 m³/h,回灌率达到91.58%,且回灌压力与回灌量之间满足多项式模型,其拟合效果较好,预测加压1.0 MPa时回灌量可达到74.52 m³/h,加压1.2 MPa时回灌量可达到106.47 m³/h。因此,说明兰州盆地砂岩型热储层具有一定的回灌性。

(2)采水井的水位并未随着开采时间而持续下降,反而在回灌量增大后水位出现了同步回升,采水井水温也未出现显著降低的现象,说明兰州盆地砂岩型热储地热尾水同层回灌技术极具可行性。同时,回灌量与回灌水温之间呈负相关关系,较低的回灌温度可以增加回灌量,且回灌水温度为30℃是一个明显的分界点,建议在实际生产中将回灌水温控制在30℃以下。

(3)经生产性试验验证和综合研究得出,适宜于兰州盆地的地热尾水回灌工艺流程为:采水井→旋流除砂器→150目不锈钢自清洗过滤器→200目尼龙网过滤器→热力站→30 μm粗滤→5 μm精滤→曝气罐→加压泵→回灌井,这也是兰州砂岩热储回灌研究的突破。

(4)通过试验分析认为,砂岩型热储地热尾水回灌的核心是过滤工艺,合理的过滤工艺可保证回灌系统的稳定运行且可减轻对回灌井的堵塞,能够有效提高回灌效率。

参 考 文 献

[1] 霍超,林倚天,李刚,等. 碳中和背景下中国地热资源勘查技术研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 4917-4927.
Huo Chao, Lin Yitian, Li Gang, et al. China's geothermal resource exploration technology research progress under the background of

carbon neutrality[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 4917-4927.

[2] 李华山,赵小双,黄思浩,等. 考虑热储特征的地热梯级供暖系统经济性与环境效益[J]. 新能源进展, 2022, 10(5): 456-462.
Li Huashan, Zhao Xiaoshuang, Huang Sihao, et al. Economic and environmental benefits of geothermal cascade heating system considering geothermal reservoir characteristics[J]. Advances in New Renewable Energy, 2022, 10(5): 456-462.

[3] 王浩,张震宇,杨建华. 禹城市城区东营组热储地热资源赋存特征研究[J]. 山东国土资源, 2014, 30(1): 33-36.
Wang Hao, Zhang Zhenyu, Yang Jianhua. Study on occurrence characteristics of geothermal resources in Dongying formation in district areas of Yucheng city[J]. Shandong Land and Resources, 2014, 30(1): 33-36.

[4] 邹晶莹. 砂岩热储地热尾水回灌化学堵塞机理研究—以鲁北地区为例[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.
Zou Jingying. Research on chemical blocking mechanism of recharge of geothermal tailwater in sandstone reservoir—take the northern part of Shandong for example[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020.

[5] 乔萌萌. 砂岩型地热尾水回灌过程中储层变形及渗流特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
Qiao Mengmeng. Study on deformation and seepage of reservoir during reinjection of tail water in sandstone geothermal engineering[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022.

[6] Kamila Z, Kaya E, Zarrouk S. A worldwide review update of reinjection in geothermal fields [C]//Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik; ResearchGate, 2020: 1-18.

[7] Kamila Z, Kaya E, Zarrouk S J. Reinjection in geothermal fields: An updated worldwide review 2020 [J]. Geothermics, 2021, 89: 101970.

[8] 中华人民共和国自然资源部. 砂岩热储地热尾水回灌技术规范: DZ/T 0330—2019[S]. 北京: 地质出版社, 2019.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. Technical specifications for geothermal tailwater reinjection in sandstone thermal storage: DZ/T 0330—2019[S]. Beijing: Geological Press, 2019.

[9] Axelsson G, Arnaldsson A, Berthet J C C, et al. Renewability assessment of the Reykjanes geothermal system, SW-iceland [C]//Proceedings of the World Geothermal Congress. Melbourne; ResearchGate, 2015: 1-10.

[10] Ganjdanesh R, Hosseini S A. Potential assessment of methane and heat production from geopressured-geothermal aquifers[J]. Geothermal Energy, 2016, 4: 1-25.

[11] Hawkins A J, Becker M W, Tsouflias G P. Evaluation of inert tracers in a bedrock fracture using ground penetrating radar and thermal sensors[J]. Geothermics, 2017, 67: 86-94.

[12] Markó Á, Múdl-Szőnyi J, Brehme M. Injection related issues of a doublet system in a sandstone aquifer: a generalized concept to understand and avoid problem sources in geothermal systems[J]. Geothermics, 2021, 97: 102234.

[13] 李红岩. 一种中深层热能采灌一体化利用系统及方法: 202211596164.6[P]. 2023-04-28.
Li Hongyan. A kind of integrated utilization system and method of medium and deep geothermal energy extraction and irrigation;

- 202211596164.6 [P]. 2023-04-28.
- [14] 李娜娜. 一种集成式地热尾水回灌处理装置: 202222322113.6 [P]. 2023-01-13.
Li Nana. An integrated geothermal tail water recharge treatment device: 202222322113.6 [P]. 2023-01-13.
- [15] 冯红喜. 地热尾水回灌系统: 201210248978.0 [P]. 2012-07-18.
Feng Hongxi. Geothermal tailwater recharge system: 201210248978.0 [P]. 2012-07-18.
- [16] 冯红喜, 阴文行. 地热回灌防腐过滤器及配套技术试验[J]. 探矿工程, 2012, 39(2): 18-21.
Feng Hongxi, Yin Wenhong. Anticorrosion filter for geothermal reinjection and the matching technology test[J]. Exploration Engineering, 2012, 39(2): 18-21.
- [17] 丁祥. 一种地源热泵封闭式等量取水还水系统: 201810526254.5 [P]. 2018-05-18.
Ding Xiang. A ground source heat pump closed equal volume water withdrawal and return system: 201810526254.5 [P]. 2018-05-18.
- [18] 王学鹏, 刘欢, 蒋书杰, 等. 沉积盆地砂岩热储回灌试验研究——以山东禹城市为例[J]. 地质论评, 2020, 66(2): 485-492.
Wang Xuepeng, Liu Huan, Jiang Shujie, et al. Reinjection experimental research on sedimentary basin sandstone reservoir—a case study of Yucheng City, Shandong[J]. Geological Review, 2020, 66(2): 485-492.
- [19] Kaya E, Zarrouk S J, O'Sullivan M J. Reinjection in geothermal fields: a review of worldwide experience[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 47-68.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地热资源地质勘查规范: GB/T 11615—2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Geological exploration specification for geothermal resources: GB/T 11615—2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [21] 刘志明, 王贵玲, 蔺文静. 地热回灌条件下单井开采权益保护半径的计算[J]. 地下水, 2014, 36(6): 72-75.
Liu Zhiming, Wang Guiling, Lin Wenjing. Calculation of the protection radius for single well mining rights under geothermal reinjection conditions[J]. Ground Water, 2014, 36(6): 72-75.
- [22] 刘帅, 冯守涛, 刘志涛, 等. 层状热储地热井权益保护半径计算探讨[J]. 中国地质调查, 2020, 7(3): 104-108.
Liu Shuai, Feng Shoutao, Liu Zhitao, et al. Discussion on the calculation of the rights protection radius of the geothermal well for stratified thermal reservoir[J]. Geological Survey of China, 2020, 7(3): 104-108.
- [23] 刘帅, 刘志涛, 冯守涛, 等. 采暖尾水回灌对砂岩热储地温场的影响——以鲁北地区为例[J]. 地质论评, 2021, 67(5): 1507-1520.
Liu Shuai, Liu Zhitao, Feng Shoutao, et al. Effect of heating tail water recharge on geothermal field of sandstone heat storage: a case study in northern Shandong Province[J]. Geological Review, 2021, 67(5): 1507-1520.
- [24] 王鹏, 向衡, 周鑫. 地热井井位部署及合理井间距浅探[J]. 化工管理, 2018(11): 72.
Wang Peng, Xiang Heng, Zhou Xin. Exploration of geothermal well location deployment and reasonable well spacing[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(11): 72.
- [25] 孔彦龙, 黄永辉, 郑天元, 等. 地热能可持续开发利用的数值模拟软件 OpenGeoSys: 原理与应用[J]. 地学前缘, 2020, 27(1): 170-177.
Kong Yanlong, Huang Yonghui, Zheng Tianyuan, et al. Principle and application of OpenGeoSys for geothermal energy sustainable utilization[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(1): 170-177.
- [26] 贺淼, 张乐, 袁一鸣, 等. 东营市南展区砂岩热储地热回灌量与温度的关系探讨[J]. 山东国土资源, 2018, 34(1): 44-48.
He Miao, Zhang Le, Yuan Yiming, et al. Study on the relationship between reinjection volume and temperature of sandstone geothermal reservoir in Nanzhan area of Dongying City[J]. Shandong Land and Resources, 2018, 34(1): 44-48.